

文章编号: 0258-2724(2014)02-0213-07 DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.2014.02.005

考虑非线性累积损伤的大跨多荷载 桥梁的疲劳可靠度评估

陈志为^{1,2}, 徐幼麟³

(1. 厦门大学土木工程系, 福建 厦门 361005; 2. 江苏省工程力学分析重点实验室, 江苏 南京 210096; 3. 香港理工大学土木与结构工程系, 香港)

摘要: 针对大跨多荷载桥梁疲劳损伤累积非线性过程中的大量不确定性, 对火车、汽车与风荷载作用下的大跨悬索桥, 利用连续损伤模型提出了一个疲劳可靠度评估方法。首先, 在连续损伤模型基础上, 对模型参数进行分析; 然后, 根据工程应用的需要, 适当简化疲劳模型, 在连续损伤模型中引入合适的随机变量, 定义疲劳可靠度分析的极限状态函数, 假定多种未来可能的交通荷载和荷载增长模式, 利用蒙特卡洛方法产生随机变量并计算失效概率; 最后以香港青马大桥为例, 讨论了该桥在不同荷载状况下使用 120 年后的疲劳失效概率。研究发现: 若保持当前的交通状态, 桥梁可保持良好状况, 但未来交通荷载的快速增长会导致结构提前失效。

关键词: 疲劳; 悬索桥; 风; 铁路; 公路; 非线性损伤; 可靠度

中图分类号: U448.27; TU311.3 **文献标志码:** A

Fatigue Reliability Analysis of Multi-loading Suspension Bridges Considering Nonlinear Accumulative Damage

CHEN Zhiwei^{1,2}, XU Youlin³

(1. Department of Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 2. Key Laboratory of Engineering Mechanics of Jiangsu Province, Nanjing 210096, China; 3. Department of Civil and Structural Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China)

Abstract: Taking into account uncertainties in the nonlinear process of fatigue damage accumulation for fatigue reliability analysis of multi-loading long-span bridges, a fatigue reliability assessment method for a long suspension bridge under combined highway, railway, and wind loadings was proposed using a continuum damage model (CDM). First, the CDM based on continuum damage mechanics was briefly introduced, and main model parameters were analyzed. Then, a simplified CDM was proposed for further application to bridge structures. A limit state function for fatigue reliability analysis based on CDM was defined by introducing proper random variables into the CDM. The Monte Carlo simulation (MCS) was adopted to generate the random variables and to calculate the failure probability. Finally, the Tsing Ma Bridge in Hong Kong was taken as a case study, and the failure probabilities of the bridge at the end of 120 years were estimated for different loading scenarios. The results indicate that the health condition of the bridge in fatigue is satisfactory under the current traffic conditions, but attentions should be paid to future traffic growth because it will largely accelerate the damage growth.

收稿日期: 2012-12-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (NSFC-51108395); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (2012121032); 江苏省工程力学分析重点实验室开放课题基金资助项目

作者简介: 陈志为 (1980-), 男, 助理教授, 博士, 研究方向为结构健康监测与既有结构评估, 电话: 13950184076,

E-mail: cezhiwei@xmu.edu.cn

引文格式: 陈志为, 徐幼麟. 考虑非线性累积损伤的大跨多荷载桥梁的疲劳可靠度评估 [J]. 西南交通大学学报, 2014, 49(2): 213-219.

Key words: fatigue; suspension bridges; wind; railway; highway; nonlinear damage; reliability

大跨度钢桥的疲劳评估非常重要,但也是一项很艰巨的任务.首先,桥梁荷载通常是很复杂的,对于一座公铁两用桥,火车、汽车与风荷载共同作用产生的动应力波动是桥梁发生疲劳破坏的主要原因.考虑到各种荷载(尤其是风荷载)的随机性,荷载出现的先后顺序会对疲劳损伤累积产生影响,具有非线性.另外,疲劳裂纹的发展速率是不均匀的,所以整个桥梁使用寿命内的疲劳损伤累积是非线性的^[1].再则,疲劳损伤累积过程有很大的不确定性^[2-3].因此,基于非线性疲劳模型估计大跨多荷载桥梁的疲劳可靠度是一项很有意义的工作.

Miner 准则被广泛地用于钢结构的疲劳损伤评估和可靠度分析^[3-4].但是,Miner 准则是一种线性模型,不能考虑疲劳裂缝产生和发展的真实机理,且不能考虑不同加载次序对损伤的影响^[5].为了解释破坏媒介在连续尺度上的力学行为,学者们提出了基于连续损伤力学的疲劳损伤模型^[6-7].这些疲劳损伤模型可用于描述损伤进化的强非线性过程.文献[8-9]研究了基于这些模型估计单种荷载下的大跨度桥梁的疲劳损伤问题,但鲜有研究涉及多荷载悬索桥的疲劳损伤,以及考虑非线性损伤累积的疲劳可靠度评估.

本文基于连续损伤模型,考虑非线性累积疲劳损伤,提出在火车、汽车与风荷载共同作用下大跨悬索桥的疲劳可靠度评估框架.首先简单介绍了基于连续损伤力学的连续损伤模型,通过简化连续损伤模型,提出了有效参数法,并进行检验.引入合适的随机变量到连续损伤模型后,定义了分析疲劳可靠度的极限状态函数.通过安装在桥上的健康监测系统实测数据,确定随机变量每日应力幅 m 次方之和的概率分布.假定多种未来可能的交通荷载和荷载增长模式,用蒙特卡洛方法产生随机变量和计算失效概率.最后,估计了青马大桥在不同荷载状况下使用 120 年后的失效概率.

1 基于连续损伤力学的疲劳分析

本节将介绍基于连续损伤力学的疲劳分析模型.先简单介绍连续损伤力学的基本理论,再对模型参数进行分析.

1.1 连续损伤力学的基本理论

关于材料的损伤累积,可认为是由于内部损伤发展,导致承受荷载的有效截面的损失.连续损伤

力学将损伤指标定义为

$$D = \frac{S - \tilde{S}}{S}, \quad (1)$$

式中: S 为名义横截面面积;

\tilde{S} 为考虑损伤后的有效截面面积.

基于温度动力学和耗散势,高周疲劳的损伤率可表示成累积微塑性应变、应变能释放率和当前损伤的函数^[7].在一维状态下,疲劳损伤率可表示为^[10]

$$\dot{D} = \frac{\sigma^2 |\sigma - \bar{\sigma}|^{\beta'}}{B(1-D)^{\alpha}} \langle \dot{\sigma} \rangle, \quad (2)$$

式中: σ 为应力;

$\bar{\sigma}$ 为应力循环的平均应力, $\bar{\sigma} = \sigma_m$;

α 、 β' 和 B' 为材料参数;

$\langle \cdot \rangle$ 为 McCauley 括弧,

$$\langle x \rangle = \begin{cases} x, & x > 0, \\ 0, & x < 0. \end{cases}$$

式(2)是高周疲劳的通用模型.特殊情况下,如果 $\bar{\sigma} = 0$ 且忽略 $(1-D)^{\alpha}$ 在单个应力循环中的波动,对式(2)进行时间积分可得:

$$\frac{\delta D}{\delta N} = \frac{2\sigma_a^{\beta'+3}}{B(\beta'+3)(1-D)^{\alpha}}, \quad (3)$$

式中: σ_a 为应力循环的幅值;

β' 为材料参数.

如果考虑平均应力效应,式(3)可写成^[10]:

$$\frac{\delta D}{\delta N} = \frac{[(\sigma_r + 2\sigma_m)\sigma_r]^{(\beta'+3)/2}}{B(\beta'+3)(1-D)^{\alpha}}, \quad (4)$$

式中: $B = 2^{\beta'+2} B'$.

式(4)中 $\sigma_m = 0$, 应力幅 σ_r 为常数.对应力循环进行积分,可得累积损伤为

$$D = 1 - \left[1 - \frac{\alpha+1}{B(\beta'+3)} \sigma_r^{(\beta'+3)} N \right]^{1/(\alpha+1)}. \quad (5)$$

1.2 模型参数的研究

现有大量等值应力幅的构造疲劳细部失效实验,基于实验结果建立了 $S-N$ (应力幅值-失效周期数) 关系曲线.但鲜有实验确定连续损伤模型的参数 B 、 β' 和 α .这些参数可通过 $S-N$ 关系曲线的参数确定.基于疲劳规范的 $S-N$ 关系曲线^[11],确定应力幅 σ_r 作用下达到构件失效的循环周期数为

$$N_f = K_2 \sigma_r^{-m}. \quad (6)$$

由式(5)也可推导出:

$$N_f = [1 - (1 - D_f)^{(\alpha+1)}] \frac{B(\beta'+3)}{\alpha+1} \sigma_r^{-(\beta'+3)}, \quad (7)$$

式中:

D_f 为结构失效的损伤特性, 反映材料的耐久性^[1,12].

由于实际采用的 α 值足够大, 使得 $[1 - (1 - D_f)^{(\alpha+1)}]$ 接近于 1, 比较式(6)和(7), 可知:

$$\left. \begin{aligned} \beta'+3 &= m, \\ \frac{B(\beta'+3)}{\alpha+1} &= K_2. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

将式(8)代入式(5)有:

$$D = 1 - \left[1 - \frac{1}{K_2} \sigma_r^m N \right]^{1/(\alpha+1)}. \quad (9)$$

在式(9)中, 非线性累积参数 α 决定模型的非线性程度. 为研究 α 对疲劳损伤累积的敏感性, 设计了数值实验. 采用恒定应力幅 $\sigma_r = 80$ MPa, 根据疲劳规范^[13], 采用 $K_2 = 6.3 \times 10^{11}$ 和 $m=3$, 用式(9)计算了对应不同 α 值 ($\alpha=0, 20, 60$ 和 100) 的疲劳损伤累积. 图1是不同 α 值的疲劳损伤累积曲线. 由图1可知, 累积损伤增长初期很慢, 后期快速增长, 有很强的非线性趋势. 累积损伤曲线的非线性随 α 的增大而加大. 特别是当 $\alpha=0$ 时, 非线性损伤模型简化为线性 Miner 模型. α 取值较小时, 损伤累积估计偏保守. 如果荷载为恒幅应力, 即使 α 取值不同, 失效所需周期数相同.

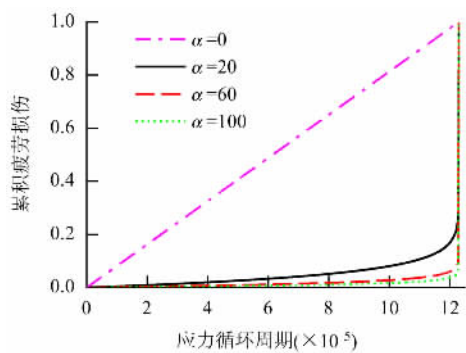


图1 不同 α 值的疲劳损伤累积

Fig. 1 Fatigue damage accumulation for different α

为了分析变幅荷载疲劳, 式(9)改写为

$$D(k) = 1 -$$

$$\left[(1 - D(k-1))^{(\alpha_k+1)} - \frac{\sigma_{r,k}^m}{K_2} \right]^{1/(\alpha_k+1)}, \quad (10)$$

式中:

$\sigma_{r,k}$ 和 α_k 为第 k 个应力循环的应力幅和非线性累积参数;

$D(k)$ 为 k 个应力循环后的累积疲劳损伤.

设初始损伤 $D(0) = 0$, 可用递推方式表示为

$$\left. \begin{aligned} D(1) &= 1 - \left(1 - \frac{\sigma_{r,1}^m}{K_2} \right)^{1/(\alpha_1+1)}, \\ D(2) &= 1 - \left[(1 - D(1))^{\alpha_2+1} - \frac{\sigma_{r,2}^m}{K_2} \right]^{1/(\alpha_2+1)}, \\ &\vdots \\ D(k) &= 1 - \left[(1 - D(k-1))^{\alpha_k+1} - \frac{\sigma_{r,k}^m}{K_2} \right]^{1/(\alpha_k+1)}. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

2 面向工程应用的模型简化

位于台风地区的大跨公铁两用悬索桥承受着由多荷载共同作用产生的变幅应力. 利用式(11)的逐步分析法可计算每步应力循环产生的累积损伤, 但考虑到大跨悬索桥的设计寿命通常是 100 年或更长, 用该方法计算这么长时间内如此多的应力循环是很困难的, 必须简化后才能实际应用.

2.1 简化方案

为了简化计算, 在一个时段的时程内提取有效参数, 利用这些参数计算该时段的累积疲劳损伤. 由于火车与汽车交通的运营基本上以天为周期, 假定一天的应力时程是一个标准段. 根据疲劳规范^[11]的两阶段 $S-N$ 关系曲线, 用有效应力幅 σ_{re} 表示标准段内所有的应力幅. 则第 k 个标准段内的有效应力幅为

$$\sigma_{re,k} = \left(\frac{1}{N_{r,k}} \left(\sum_{i=1}^{N_1} n_i \sigma_{r,i}^m + \frac{1}{\sigma_{r,0}^2} \sum_{i=1}^{N_2} n_i \sigma_{r,i}^{m+2} \right) \right)^{1/m}, \quad (12)$$

式中:

n_i 为应力幅 $\sigma_{r,i}$ 的作用次数, 由雨流计数法从第 k 段的应力时程中确定;

N_1 和 N_2 分别为应力幅大于和小于 $\sigma_{r,i}$ 的循环次数;

$N_{r,k}$ 为第 k 段时程的应力循环总数;

m 为 $S-N$ 关系曲线参数, 取为 $m=3.0$.

非线性累积参数 α_e 是模型的另一个有效参数, 也由一天内的应力循环确定. 对不同应力幅的应力循环, α 值取值不同. 但 α 取值小, 会使疲劳估计偏于保守. 为了简化计算, 根据文献[10]的公式, 由第 k 段的最大应力幅确定最小 α 值, 并作为有效累积参数 $\alpha_{e,k}$. 将有效参数 $\sigma_{re,k}$ 和 $\alpha_{e,k}$ 代入

式(10),可计算第 k 段时程的累积损伤为

$$D(k) = 1 - \left[(1 - D(k-1))^{\alpha_{e,k}+1} - \frac{N_{r,k} \sigma_{re,k}^m}{K_2} \right]^{1/(\alpha_{e,k}+1)} \quad (13)$$

2.2 简化模型的验证

为验证简化模型的有效性,用该方法进行实桥的疲劳计算.图2是在桥梁某疲劳关键位置由多荷载产生的一天热点应力时程.利用雨流计数法,可确定图2应力时程的应力幅序列,其中共有72 333个应力循环.

用式(12)确定该段时程的有效应力幅 $\sigma_{re} = 6.0$ MPa.该段时程的最大应力幅为69.1 MPa,可得有效非线性累积参数 $\alpha_e = 92.1$.利用逐步分析法和有效参数法,分别利用式(11)和(13)计算一天的疲劳损伤累积.比较两者的结果,可判断有效参数方法的合理性.由图3可知,两种方法得到的最终累积损伤非常接近,但总体上有效参数法比逐步分析法更保守一点.这说明以天为单位利用有效参数法估计损伤累积是合理和有效的.

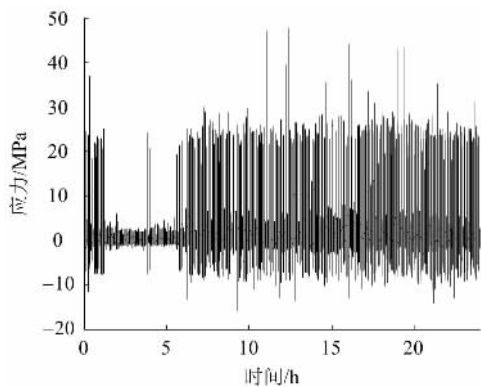


图2 多荷载下的应力时程样本
Fig. 2 A sample stress time history under multiple types of loading

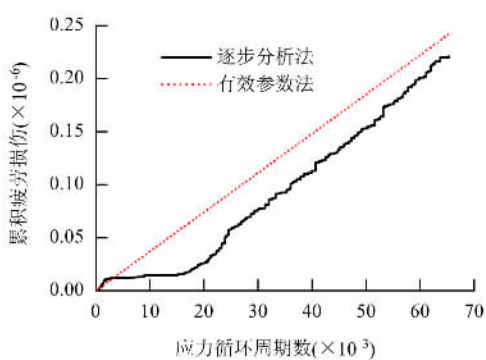


图3 一天的疲劳损伤累积
Fig. 3 Fatigue damage accumulation in a daily block

3 基于连续损伤力学的疲劳可靠度评估

3.1 分析框架

为考虑非线性损伤累积过程中存在的不确定性,本节提出基于连续损伤模型的疲劳可靠度分析框架.极限状态函数(式(13))用于描述疲劳关键位置的疲劳抗力和疲劳荷载之间的关系.疲劳极限状态可定义为:当施加更多荷载时疲劳损伤不再增加的特征点对应的状态,即 $D(k) \leq D(k-1)$,结构已不能再承受更进一步的损伤.为了计算简便,将式(13)的连续损伤累积过程简化成一个离散过程,以天为单位进行更新.

与确定性疲劳分析不同,疲劳可靠度分析需考虑疲劳荷载和疲劳抗力的随机性.从疲劳荷载的角度,多荷载产生的应力时程是一个随机过程,即应力幅值的大小是确定的而循环次数是随机的.火车与汽车交通的运营以天为基本周期,故一天的应力幅 m 次方之和 $S_{mr,k}(k)$ 的取值范围为 $[1, N_b]$, N_b 为以天为单位的应力段个数)是与疲劳荷载相关的随机变量.另外,疲劳损伤累积参数 Δ 和疲劳细部参数 K 是与疲劳抗力相关的随机变量.

假定给定时间段的荷载状况保持不变,用同一个随机荷载模型生成该期间一天的随机应力时程.假定非线性累积参数 $\alpha_{e,k}$ 在同一个时间段内保持不变,定义基于连续损伤模型的疲劳可靠度分析的极限状态函数为

$$g(X) = D(k) - D(k-1), \quad (14)$$

$$D(k) = 1 - \left[(1 - D(k-1))^{\alpha_{e,k}+1} - \frac{S_{mr,k}}{K\Delta} \right]^{1/(\alpha_{e,k}+1)}, \quad (15)$$

$$S_{mr,k} = \sum_{i=1}^{N_1} n_i \sigma_{r,i}^m + \frac{1}{\sigma_{r,0}^2} \sum_{i=1}^{N_2} n_i \sigma_{r,i}^{m+2} = N_r \sigma_{re,k}^m, \quad (16)$$

式中: $S_{mr,k}$ 为一天的应力幅 m 次方之和,

$$S_{mr,k} = N_r \sigma_{re,k}^m.$$

疲劳损伤累积参数 Δ 是随机变量,它服从均值 $\mu_\Delta = 1.0$,标准差 $\sigma_\Delta = 0.3$ 的对数正态分布^[14].假定疲劳细节参数 K 服从对数正态分布,它的均值和方差可在英国疲劳规范^[11]附录A中查到.

根据定义的极限状态函数,下一步可估计构件的失效概率 P_f .为此,采用Monte Carlo模拟方法求解,包括从极限状态函数的所有随机变量中不断随机抽取新样本,并检查是否会发生失效(极限状态

函数是否会小于0)。N次模拟后,用下式估计失效概率,

$$P_f \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I[g(X_i) < 0], \quad (17)$$

$$I[g(X_i) < 0] = \begin{cases} 1, & g(X_i) < 0, \\ 0, & \text{否则}, \end{cases}$$

式中:

$g(X_i)$ 为第 i 次模拟的极限状态函数值;

X_i 为由 n 个随机变量组成的向量,

$$X_i = (X_{i,1}, X_{i,2}, \dots, X_{i,n}),$$

其中: $X_{i,1}$ 和 $X_{i,2}$ 分别为随机变量 Δ 和 K ;

$$X_{i,3} \sim X_{i,n} \text{ 为随机变量 } S_{mr,k}.$$

3.2 基于健康监测系统的多跨多荷载桥梁的动应力分析

作为实例,将可靠度评估的框架应用到青马大桥。青马大桥是一座位于台风地区的公铁两用桥(见图4)。桥上装有健康监测系统,用火车、汽车与风荷载的实测数据确定桥梁当前的荷载状况。基于实测荷载信息,利用作者之前提出的工程分析方法,可计算由火车、汽车与风荷载引起的动应力响应^[13]。该方法基于应力影响线计算火车和汽车产生的桥梁应力响应,风引起的应力计算考虑了作用在桥面上的抖振风和自激励风,多荷载的应力响应由这种荷载产生的应力响应叠加而成。



图4 火车、汽车与风荷载下的青马大桥
Fig.4 Tsing Ma Bridge under railway, highway, and wind loading

火车荷载是该桥疲劳损伤的决定性因素,因此,基于一列标准火车过桥在桥梁构件关键点上的动应力时程,比较时程最大应力幅,然后,确定每类构件的疲劳关键位置。研究发现,疲劳关键截面主要分布在两个桥塔附近^[13]。选择其中6个疲劳关键位置进行后续疲劳分析。

关键位置 Z_1 位于马湾塔附近外纵向桁架斜杆截面的上翼缘; Z_2 位于青衣桥塔外纵向桁架下弦

杆截面的下翼缘; Z_3 位于青衣桥塔截面内纵向桁架上弦杆截面的上翼缘; Z_4 位于青衣桥塔内纵向桁架下弦杆截面的下翼缘; Z_5 位于青衣桥塔截面的轨道梁T形截面的下翼缘; Z_6 位于青衣桥塔附近下部横撑架截面的上翼缘。基于单元每端的5个应力点计算疲劳关键点的名义应力。用名义应力乘以应力集中系数,确定考虑了焊点位置的热点应力。本研究根据青马桥设计时的应力集中系数取值,采用应力集中系数值为1.4。后续提及的疲劳关键位置的疲劳损伤都是基于这些热点位置。

3.3 每日应力幅 m 次方之和的概率分布

对一座装有健康监测系统的多跨多荷载悬索桥,每日应力幅 m 次方之和的概率分布可通过以下3个步骤得到^[15]:

(1) 基于长期的测量数据,建立了火车、汽车与风荷载的概率模型。其中:火车荷载概率模型的随机变量包含火车的总重和到达时刻;汽车荷载的随机变量包含汽车总重和相邻汽车到达时间间隔;风荷载的概率模型考虑风速和风向两个随机变量。所有随机变量都来源于长期健康监测数据,在此基础上建立概率分布模型。

(2) 假定不同类型的荷载相互独立,分别基于3种荷载概率模型,利用蒙特卡洛方法生成模型的随机变量,用有限元模型模拟疲劳关键位置3种荷载的应力响应,然后叠加得到多荷载的每日随机应力响应。

(3) 基于每日随机应力响应样本,估计一天的 S_{mr} 概率分布,然后基于未来荷载和交通增长模式的假定,估计所关心时段内 S_{mr} 的概率分布。

考虑到火车与汽车交通在未来有可能增长,假定了两种未来交通荷载。第1种未来交通荷载,假定火车与汽车荷载相比目前都有30%的增长(增长I型)。第2种未来交通荷载,假定火车增长10%,汽车增长100%(增长II型)。基于假定的交通荷载,可估计在不同荷载(当前荷载、未来I型和未来II型荷载)状态下,青马大桥疲劳关键位置在火车、汽车与风荷载作用下的 S_{mr} 概率分布。图5是在当前荷载下关键位置 Z_1 的 S_{mr} 柱状图和理论分布。用200个随机样本估计得到柱状图,理论密度函数服从正态分布。拟合正态分布的均值和方差分别为 1.15×10^{12} 和 3.22×10^8 。由图5可知,理论密度函数与柱状图吻合良好。

为了能生成整个桥梁设计寿命内的 S_{mr} ,研究中采用了线性、指数I型和指数II型的3种交通量

增长模式. 线性增长模式假定桥梁通车的前 T_r 年交通量不增长, 从 T_r 到 T_f 年以固定增长率 α_g 线性增长, 设线性增长函数为

$$X = \begin{cases} X_0, & t \leq T_r, \\ X_0(1 + \alpha_g t), & t > T_r. \end{cases} \quad (18)$$

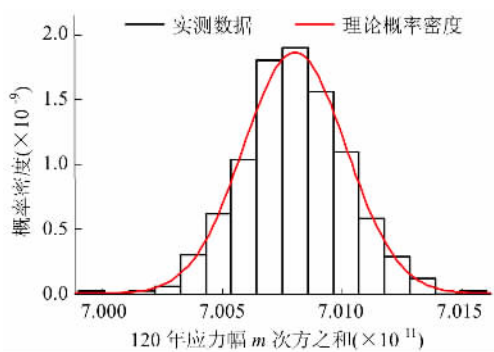


图5 每日应力幅 m 次方之和的概率密度函数
Fig. 5 Probability density function of the daily sum of m -power stress ranges

另外, 还假定了两种指数型增长模式^[16]. 通过简单的代数运算可得以下表达式.

指数 I 型增长表达式为

$$X = \begin{cases} X_0, & t \leq T_r, \\ X_0(1 + n\alpha_g)^{t/(nT_r)}, & t > T_r. \end{cases} \quad (19)$$

指数 II 型增长表达式为

$$X = \begin{cases} X_0, & t \leq T_r, \\ X_0 \left\{ 1 + (1 + n\alpha_g) \left[1 - \left(\frac{1}{1 + n\alpha_g} \right)^{t/(nT_r)} \right] \right\}, & t > T_r. \end{cases} \quad (20)$$

基于假定的未来交通荷载和荷载增长模式, 可估计青马大桥 120 年设计寿命内应力幅 m 次方之

和的概率分布. 更多计算细节可参考文献 [15].

3.4 可靠度分析结果

本节主要求解青马大桥 6 个疲劳关键位置的疲劳可靠度(或失效概率).

第 1 步, 确定随机变量的概率分布, 进行可靠度分析. 随机变量 K 的均值 $\mu_K = 1.73 \times 10^{12}$, 方差 $\sigma_K = 0.52 \times 10^{12}$. 随机变量 Δ 的均值 $\mu_\Delta = 1.0$, 方差 $\sigma_\Delta = 0.3$. S_{mr} 的概率分布在给定月份保持不变, 在不同月份根据荷载增长模式发生改变. 在不同增长模式下, 确定疲劳关键位置 120 年内不同月份 $S_{mr,k}$ 的分布参数^[15]. 对交通无增长的情况, 采用固定的 α_e ; 对交通增长的情况, α_e 在不同月份发生改变.

第 2 步, 从对应的概率分布中随机抽取变量 K 、 Δ 和 $S_{mr,k}$ 形成随机变量的向量.

第 3 步, 将向量代入极限状态函数, 计算式 (14) 的疲劳可靠度 $g(X_i)$. 当 $g(X_i) < 0$ 时, N_f 增加 1. 重复 N 次后, 计算 N_f/N 的失效概率 P_f .

重复该过程, 可估计桥梁 6 个疲劳关键位置使用 120 年后的疲劳失效概率. 交通荷载保持与当前状态一致(无增长)、指数 I 型和指数 II 型增长的结果见表 1. 疲劳规范推荐的参考失效临界值是 2.3%^[11]. 如果大于该值则认为结构构件处于危险状态. 疲劳失效概率最大值在位置 Z_1 .

在保持目前的交通状态下, 6 个疲劳关键位置使用 120 年后失效概率的最大值接近于规范提供的参考失效概率值. 这说明青马大桥在当前荷载下的疲劳健康状况可保持良好. 从表 1 中还可发现, 如果考虑交通增长, 失效概率会远大于参考失效值, 因此, 需特别注意未来交通荷载增长引起的结构提前失效.

表 1 使用 120 年后疲劳关键位置的疲劳失效概率

Tab. 1 Fatigue failure probabilities at the end of 120 years at the fatigue critical locations

荷载	增长模式	疲劳关键位置					
		Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5	Z_6
C	无	0.02	0.02	6×10^{-3}	5×10^{-3}	8×10^{-6}	2×10^{-5}
	线性	0.21	0.19	0.03	0.03	4×10^{-3}	6×10^{-3}
$C \rightarrow F_1$	指数 I	0.17	0.15	0.02	0.02	2×10^{-3}	3×10^{-3}
	指数 II	0.24	0.23	0.05	0.04	8×10^{-3}	0.01
$C \rightarrow F_2$	线性	0.21	0.12	5×10^{-3}	6×10^{-3}	3×10^{-4}	3×10^{-3}
	指数 I	0.17	0.10	5×10^{-3}	5×10^{-3}	3×10^{-4}	3×10^{-4}
	指数 II	0.24	0.15	6×10^{-3}	8×10^{-3}	5×10^{-4}	4×10^{-4}

注: C 表示当前荷载, F_1 表示未来荷载 I 型, F_2 表示未来荷载 II 型.

4 结束语

本文面向火车、汽车与风荷载作用下的大跨悬索桥,利用连续损伤模型提出靠疲劳可靠度评估方法,并将其应用到香港青马大桥。利用健康监测的实测数据建立当前荷载的概率模型,并假定了几种未来荷载和荷载增长模式。分析青马大桥在不同荷载状况下使用120年的失效概率可发现,如果保持目前的交通状态,青马大桥的疲劳健康状况可保持良好;但需特别注意未来交通荷载增长引起的结构提前失效。另外,本文在研究构件失效的基础上,分析了构件的疲劳可靠度。对于复杂桥梁结构的整体可靠度,还需今后更多细致的研究。

参考文献:

- [1] American Society of Civil Engineering (ASCE). Committee on fatigue and fracture reliability, structural safety and reliability of the structural division, fatigue reliability [J]. Journal of Structural Engineering-ASCE, 1982, 108: 3-88.
- [2] WIRSCHING P H. Probabilistic structural mechanics handbook: probabilistic fatigue analysis [M]. New York: Chapman and Hall, 1995: 146-165.
- [3] CHUNG H C. Fatigue reliability and optimal inspection strategies for steel bridges [D]. Austin: University of Texas at Austin, 2004.
- [4] ZHOU Y. Assessment of bridge remaining fatigue life through field strain measurement [J]. Journal of Bridge Engineering-ASCE, 2006, 11(6): 737-744.
- [5] LEMAITRE J. A course of damage mechanics [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1996: 95-152.
- [6] KACHANOV L M. Introduction to continuum damage mechanics [M]. Dordrecht: Martinus Nijhoff, 1986: 121-126.
- [7] KRAJCINOVIC D, LEMAITRE J. Continuum damage mechanics: theory and applications [M]. Vienna: Springer, 1987: 1-93.
- [8] LI Z X, CHAN T H T, KO J M. Fatigue damage model for bridge under traffic loading: application made to Tsing Ma Bridge [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2001, 35(1): 81-91.
- [9] XU Y L, LIU T T, ZHANG W S, et al. Buffeting-induced fatigue damage assessment of a long suspension bridge [J]. International Journal of Fatigue, 2009, 31: 575-586.
- [10] LI Z X, CHAN T H T, KO J M. Fatigue analysis and life prediction of bridges with structural health monitoring data, part I: methodology and strategy [J]. International Journal of Fatigue, 2001, 23: 45-53.
- [11] British Standard Institute (BSI). BS5400: part 10, steel, concrete and composite bridges, code of practice for fatigue [S]. London: BSI, 1980.
- [12] BHATTACHARYA B, ELLINGWOOD B. Continuum damage mechanics analysis of fatigue crack initiation [J]. International Journal of Fatigue, 1998, 20: 631-639.
- [13] CHEN Z W, XU Y L, XIA Y, et al. Fatigue analysis of long-span suspension bridges under multiple loading: case study [J]. Engineering Structures, 2011, 33: 3246-3256.
- [14] WIRSCHING P H. Fatigue reliability for offshore structures [J]. Journal of Structural Engineering-ASCE, 1984, 110: 2340-2356.
- [15] CHEN Z W. Fatigue and reliability analyses of multi-load suspension bridges with WASHMS [D]. Hong Kong: The Hong Kong Polytechnic University, 2010.
- [16] RIGHINIOTIS T D. Effects of increasing traffic loads on the fatigue reliability of a typical welded bridge detail [J]. International Journal of Fatigue, 2006, 28(8): 873-880.

(中文编辑:秦萍玲 英文编辑:兰俊思)